

## **Краткое описание о выполненных работах по плану-графику и полученных научно-технических результатах в ходе выполнения проекта.**

В соответствии с планом-графиком исполнения обязательств был достигнут существенный прогресс в сооружении новой электромагнитной системы (ЭМС) токамака Глобус-М, предназначенной для увеличения основных инженерных и, как следствие, физических параметров установки. Новая ЭМС позволит увеличить магнитное поле и протекающий по плазме ток в 2-2,5 раза до значений поля в 1 Тл и тока плазмы в 500000 ампер. Наибольший успех связан с изготовлением центральной колонны ЭМС, состоящей из 16-ти сегментов обмотки тороидального магнитного поля, собранных в виде монолитного стержня, и намотанного на стержень центрального соленоида для возбуждения тока плазмы. Для всех компонентов колонны использованы специальные медные проводники, прочность которых примерно в 3 раза превышает прочность обычной электротехнической меди. Уникальная технология намотки соленоида была разработана при изготовлении полномасштабного макета. Она обеспечивает свободное перемещение соленоида относительно стержня ОТП, что необходимо для надежной эксплуатации УНУ. В настоящее время рассматривается вопрос об оформлении патента на данную технологию. Качество намотки соленоида было проверено путем подробных измерений магнитных полей и потоков вблизи его поверхности. На основании результатов измерений была создана математическая модель соленоида.

Согласно заданию на выполнение работ были изготовлены основные части ЭМС:

- обмотка тороидального магнитного поля (ОТП),
- две катушки управления ОУ3 полоидальной магнитной системы,
- две катушки управления ОУ1 полоидальной магнитной системы,
- две катушки управления ОКЗ полоидальной магнитной системы,
- центральный соленоид, силовая структура ЭМС,
- компенсатор верхний (16 шт.),
- компенсатор нижний (15 шт.),
- подставка для ЭМС токамака.

Работы по изготовлению выполнялись в ЗАО «ИНТЕХМАШ» и АО «НИИЭФА». В АО «НИИЭФА» проводились работы, связанные с намоткой проводников (центральный соленоид, катушки управления), изготавливались гибкие компенсаторы, изготавливались элементы опорной структуры ЭМС, требующие нанесения изолирующих покрытий (изолированные штифты, болты, части крестовин). Работы в АО «НИИЭФА» полностью завершены.

В ЗАО «ИНТЕХМАШ» изготавливались внешние полувитки обмотки тороидального магнитного поля, контактные зажимы, подставка под ЭМС токамака, прочие части опорной структуры. На этапе №3 в ЗАО «ИНТЕХМАШ» будет проведена контрольная сборка ЭМС.

Для повышения магнитного поля и тока плазмы недостаточно изготовления ЭМС с повышенной стойкостью к механическим и тепловым нагрузкам. Необходимы также источники питания, способные развивать требуемые токи в соответствующих обмотках. С этой целью на этапе №2 изготовлен управляемый реверсивный источник питания нового центрального соленоида, который обеспечит ток в нагрузке  $\pm 70$  кА. Шестифазный источник собран на базе тиристоров типа ТЗ200. Компоновка модулей с силовым оборудованием и системами управления позволяет осуществить их монтаж в помещении подстанции УНУ на площадке ФТИ им.А.Ф.Иоффе без существенной переделки силовых фидеров со стороны переменного и выпрямленного тока.

Получили развитие системы дополнительного нагрева плазмы. Новые элементы волноводного передающего тракта предназначены для системы нижне-гибридной генерации тока. Для экспериментов с плазмой с повышенной плотностью в модернизированной установке Глобус-М2 модернизирован источник питания эмиссионного электрода инжектора атомов. Такая мера позволит увеличить энергию инжектируемого в плазму нейтрального пучка.

На отчетном этапе усовершенствован ряд диагностических методик для исследования параметров плазмы и разработаны две новые диагностические методики. Методика измерения потоков нейтронов с помощью газоразрядных счетчиков СНМ-11 предназначена для исследования процессов взаимодействия пучков быстрых частиц с плазменной мишенью. Методика измерения и расчета радиационных потерь на основе спектрометрических измерений имеет широкий

спектр применения. Она, в частности, позволит оценить потери на излучение из плазмы при использовании различных типов защитных материалов обращенной к плазме поверхности.

В рамках Программы научных исследований продолжены эксперименты по инъекции в плазму пучков атомов высокой энергии. Продолжены экспериментальные и теоретические исследования генерации безындукционного тока резонансным электромагнитным излучением. Впервые проведено сравнение двух методов реконструкции магнитного равновесия с результатами оптических наблюдений. С помощью доплеровских рефлектометров получены новые данные о развитии в плазме периферийных неустойчивостей типа геодезических акустических мод. Впервые на сферических токамаках апробировано взаимодействие плазмы с ИТЭР-подобным вольфрамом, подвергнутым предварительной эрозии. Было показано, что предварительная обработка поверхности вольфрамовых плиток электронным пучком и плазменной пушкой не оказывает существенного влияния на распыления материала. Впервые на сферических токамака на основе анализа диамагнетизма плазмы получены данные о тепловой энергии при инъекции в плазму нейтрального пучка. Полученные результаты позволяют сделать оптимистический прогноз параметров плазмы, которые будут достигнуты после модернизации электромагнитной системы УНУ Глобус-М.

Результаты исследований изложены в 8-ми докладах на XLII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (9-13 февраля, г.Звенигород). Основные научные результаты, достигнутые с помощью УНУ, представлены в приглашенном устном обзорном докладе на ежегодной 42-й Конференции Европейского физического общества по физике плазмы, (22-26 июня 2015 г., г.Лиссабон, Португалия). С докладом выступил аспирант третьего года обучения Н.Н.Бахарев. Всего на конференции представлено 6 докладов. По результатам исследований геодезических акустических мод опубликована статья в журнале «Письма в ЖТФ». Приняты к публикации статьи в журналах «Физика плазмы» и «Nuclear Fusion».

Руководитель темы  
гл.н.с., д. ф.-м. н.

\_\_\_\_\_  
« \_\_\_ » В.К.Гусев  
2015 г.